

(11)特許出願公開番号  
特開2003-130699  
(P2003-130699A)

(43)公開日 平成15年5月8日(2003.5.8)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

レポート(参考)

G O I F 1/66

103

G O I F 1/66

103

2 F 0 3 5

審査請求 未請求 請求項の数9 OL (全 13 頁)

(21)出願番号 特願2001-329654(P2001-329654)

(22) 出題日 平成13年10月26日 (2001. 10. 26)

(71)出願人 000003687

東京電力株式会社

東京都千代田区内幸町1丁目1番3号

(71)出願人 500112663

武田 靖

北海道札幌市北区北八条西5丁目 中央第一公務員宿舎12-12

(72)發明者 森 治嗣

神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号  
東京電力株式会社原子力研究所内

(74) 代理人 100078765

弁理士 波多野 久 (外1名)

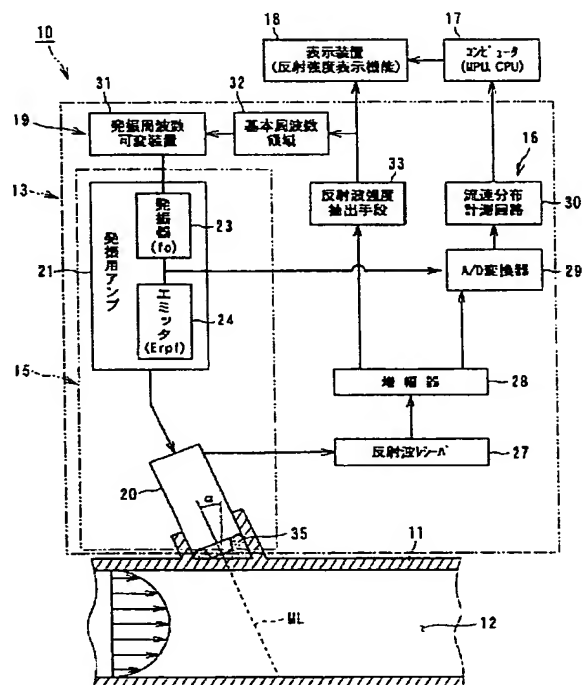
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ドップラ式超音波流量計

(57)【要約】

【課題】種々の流体配管内を流れる被測定流体の流量を簡単かつ容易に、しかも非接触で正確に精度よく測定できる汎用性の高いドップラ式超音波流量計を提供する。

【解決手段】トップラシ超音波流量計１０は、超音波トランスジューサ２０から流体配管１１内に超音波パルスを入射させる超音波送信手段１５と、流体配管１１内の測定領域から反射された超音波エコーを受信し、被測定流体１２の流速分布を測定する流速分布測定手段１６と、被測定流体１２の流速分布からその流量を算出する流体流量演算手段１７と、超音波トランスジューサ２０から共鳴的透過現象を生じさせる超音波の基本周波数を自動的に選択する周波数選択設定手段１９とを有する。周波数選択設定手段１９は、選択された最適周波数の超音波を超音波トランスジューサ２０から発振させるように、超音波送信手段１５を作動制御するようにしたものである。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 超音波トランスジューサから超音波パルスを送信手段と、

被測定流体に入射された超音波パルスのうち、流体配管内の測定領域から反射された超音波エコーを受信し、上記測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流速分布測定手段と、

上記被測定流体の流速分布に基づいて被測定流体の流量を算出する流体流量演算手段と、

前記流体配管の管壁に対し超音波トランスジューサから共鳴的透過現象を生じさせる超音波の基本周波数を自動的に選択する周波数選択設定手段とを有し、この周波数選択設定手段は、選択された最適周波数の超音波を超音波トランスジューサから発振させるように前記超音波送信手段を制御するようにしたことを特徴とするドップラ式超音波流量計。

【請求項2】 前記発振周波数選択設定手段は、超音波トランスジューサから発振される超音波パルスの発振周波数を自動的に調節設定しており、超音波半波長の整数倍が流体配管の壁厚となるように超音波パルスの発振周波数が選択された請求項1に記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項3】 前記発振周波数選択設定手段は、超音波トランスジューサから所要の発振周波数の超音波を発振させる発振用アンプと、この発振用アンプの発振周波数を可変可能に調節設定する発振周波数可変装置と、予め指定された周波数領域内で発振周波数可変装置を動作させる周波数領域設定手段と、前記超音波トランスジューサから発振された超音波パルスのうち、流体配管内の測定領域から反射される超音波エコーを受信する超音波受信手段と、受信された超音波エコーの強度を抽出し、記憶させる反射波強度抽出手段とを備え、前記発振周波数選択設定手段は発振周波数の抽出選定操作が繰り返し行なわれて超音波の最適周波数が自動的に選択するようにした請求項1または2に記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項4】 前記ドップラ式超音波流量計は、前記超音波トランスジューサから被測定流体に入射される超音波パルスの入射角度を調節設定する入射角調節設定手段をさらに備え、この入射角調節設定手段は、流体配管の管壁に対し超音波パルスが共鳴的透過現象を生じさせる入射角度となるように、超音波トランスジューサを流体配管に調節設定可能に設け、前記周波数選択設定手段と入射角調節設定手段とを組み合わせた請求項1記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項5】 超音波トランスジューサから超音波パルスを流体配管内を流れる被測定流体に入射させる超音波

送信手段と、

被測定流体に入射された超音波パルスのうち、流体配管内の測定領域から反射された超音波エコーを受信し、上記測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流体速度分布測定手段と、

上記被測定流体の流速分布に基づいて、被測定流体の流量を算出する流体流量演算手段と、

10 前記超音波トランスジューサから被測定流体に入射される超音波パルスの入射角度を調節設定する入射角調節設定手段とを備え、この入射角調節設定手段は、流体配管の管壁に対し超音波パルスが共鳴的透過現象を生じさせる入射角度となるように、超音波トランスジューサを流体配管に調節設定可能に設けたことを特徴とするドップラ式超音波流量計。

【請求項6】 前記入射角調節手段は、流体配管に外側から設けられた超音波トランスジューサと、

20 この超音波トランスジューサから発振される超音波パルスの入射角度を調節設定可能な入射角変換機構と、予め指定された入射角領域の範囲内で上記入射角変換機構を動作させる入射角領域設定手段と、

前記超音波トランスジューサから発振される超音波パルスのうち、流体配管内の測定領域から反射される超音波エコーを受信して超音波エコーの強度を抽出し、記憶する反射波強度抽出手段とを備え、

30 前記入射角調節設定手段は、超音波パルス入射角度の抽出選定操作が繰返し行なわれて最適な超音波パルス入射角度を自動的に選択するようにした請求項5記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項7】 前記超音波トランスジューサは流体配管の外側に取付角度が調節自在に設けられ、上記超音波トランスジューサの取付角度を入射角変換機構により選択することにより、超音波トランスジューサから発振される超音波パルスの入射角度を調節設定した請求項5または6記載のドップラ式超音波流量計。

40 【請求項8】 流体配管に設けられた第1の超音波トランスジューサと、この超音波トランスジューサから流体配管の軸方向に離間して設けられた第2の超音波トランスジューサと、第1の超音波トランスジューサを第2の超音波トランスジューサに相対的に進退させる超音波トランスジューサ移動機構とを備え、前記両超音波トランスジューサは発振される超音波パルスが流体配管内の測定領域で直交するように配設されたことを特徴とするドップラ式超音波流量計。

50 【請求項9】 前記ドップラ式超音波流量計は、前記第1および第2の超音波トランスジューサから発振された超音波パルスの流体配管内の測定領域から反射波である超音波エコーをそれぞれ受信する反射波レシーバと、各反射波レシーバで受信された超音波エコー強度から超音波測定線方向の速度ベクトルをそれぞれ算出する速度ベ

クトル算出手段と、各速度ベクトル算出手段で算出された速度ベクトルのベクトル和から被測定流体の流速ベクトルを算出する流速ベクトル算出手段とをさらに備え、流速ベクトル算出手段で算出される流体配管内の測定線方向の流速分布から被測定流体の流量を算出する請求項 8 記載のドップラ式超音波流量計。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流量を測定するドップラ式超音波流量計に係り、特に超音波の最適周波数や最適入射角度を自動的に調整し、設定可能なドップラ式超音波流量計に関する。

【0002】

【従来の技術】流体配管内を流れる被測定流体の流速や流量を測定する流量計には、測定原理により 2 種類に大別される。

【0003】第 1 の流量計は、流体配管内を流れる流体のプロセス量が流れ方向に変化することを利用して流量を測定するものであり、この種の流量計には、オリフィス流量計がある。オリフィス流量計はオリフィス上流側と下流側とで流体の圧力が異なることを利用して流量を計測するものであり、このような流量計測方法を、以下「平均値近似法」という。

【0004】第 2 の流量計は、主に円管等の配管内の流れの流量測定に用いられるものである。

【0005】この流量計では、配管内の流れの一点、例えば管軸上の所定点での流速を測定し、得られた測定値に基づいて理論値から配管内の流速分布形状を仮定し、この流速分布形状を積分して流量を求めるものである。このような流量測定方法を、以下「近似積分法」という。

【0006】一方、流量計の中には、測定対象である被測定流体に超音波を照射して流体の流量を計測する超音波流量計が知られている。

【0007】この超音波流量計には、平均値近似法により流量を計測するものと、近似積分法により流量を計測するものに大別される。

【0008】平均値近似法を採用した超音波流量計は、超音波パルスが一定の間隔の 2 点間を通過するのに要する時間が、超音波パルスが流体の流れの上流に向けて進む場合と、その逆に流れの下流に向けて進む場合とで、流体の流れの速度だけ異なることを利用し、所定の 2 点間の平均速度を求め、流量を計測するものである。

【0009】また、近似積分法を採用した超音波流量計は、配管の中心軸上の一点での被測定流体の速度をドップラシフト法を利用して求め、この流体速度から流量を計測するものであり、特開平 6-294670 号公報に開示されたものがある。この近似積分法の超音波流量計では、理論値あるいは経験則から流速分布の形を求めて

積分を行なうものである。例えば、配管内の層流領域では流速分布は放物線で表われるから、管壁での境界条件を使用することにより、中心軸上で測定された流体速度を用いて流量を求めることができる。この理論解は、厳密には定常状態の流れに対して成立するものであるの

で、近似積分法の超音波流量計は、定常状態の流れにし

【0010】一般に、粘性流体の流れは、ナビエ・ストウスク (Navier-Stokes) の方程式 (以下、NS 方程式という。) として良く知られている。従来の超音波流量計は、NS 方程式の時間微分項を無視して定常状態に対する流動分布の知識を利用して流量を求めている。このため、流量が時間的に変動し、近似積分法が成立しない流動場 (流体の流れの場) が測定対象である場合には、測定精度が著しく低下したり、測定結果の有効性が損われる虞がある。

【0011】このような流動場として、例えば平均流量を出すに必要な時間より流量系の変動時間が短い流動場や、流れが十分に発達していない流動場が挙げられる。前者の場合には、NS 方程式の時間微分項がゼロにならず、後者の場合には、NS 方程式の一次元近似が成立しない。

【0012】従来の流量計では、定常状態における流量計測であり、十分な精度で流量測定を行なうためには、例えば測定箇所の上流側に流れを定常化させる助走路を非常に長くする必要があり、配管施設に時間とコスト、労力を要する一方、定常状態の流れの流量計測であるため、非定常状態の流れの流量計測を行なうことが困難であった。

【0013】また、従来の流量計は、円管などの閉じた配管内を流れる流体の平均流量を測定対象とするため、より大きな流量体系の局所的な流量を測定することが不可能であった。例えば、非常に大きな攪拌槽の入口付近あるいは出口付近の時間変動を伴う特徴的な流量計測は、いずれの流量計においても測定不可能であった。

【0014】ところで、三次元空間の流量場における被測定流体の流れは、三次元のベクトル量で表わされるのに対して、従来の流量計は、配管内に一次元の流れを仮定して流量計測を行なうものである。このため、閉じた配管内であっても、流れが三次元的になっている場合には、流量の測定精度が非常に悪くなったり、不可能となる。例えば、エルボ配管や U 字状の反転配管のように曲げられた配管の直後では、流体の流れが遠心力作用により三次元的になっており、このような場所に従来の流量計を設置しても流量計測を正確に行なうことができない。

【0015】そこで、本発明者等は、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流量を非定常状態の流れであっても、時間依存で正確に精度よく非接触で測定で

きるドップラ式超音波流量計を特願平 10-272359 号明細書で提案した。

【0016】このドップラ式超音波流量計は、流体配管内を流れる被測定流体の瞬時の流速分布から直接流量を算出する手法を適用したものであり、被測定流体の流量計測に高い精度や応答性を持つことを知見した。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】従来のドップラ式超音波流量計においても、流体配管内を流れる被測定流体の流量計測を簡易にかつ大きな汎用性をもって行なわれることが望まれる。

【0018】ドップラ式超音波流量計で種々の流体配管内を流れる被測定流体の流速をスムーズにかつ円滑に測定するためには、種々の管壁厚の流体配管に対しても超音波の透過効率を十分に確保し、十分な反射波 S/N 比を確保する必要がある。

【0019】従来のドップラ式超音波流量計では、超音波の金属壁の透過特性を金属壁の肉厚を変化させることで調べ、流体配管の肉厚が最適となるように設定してきた。

【0020】しかしながら、ドップラ式超音波流量計の実機への適用により、流体配管の肉厚を種々変化させることは不可能であり、流体配管の種類毎に最適な超音波透過特性を持つ超音波流量計を用意しなければならず、汎用性の低いものである。

【0021】本発明は、上述した事情を考慮してなされたもので、種々の流体配管内を流れる被測定流体の流量を簡単かつ容易に、しかも非接触で正確に精度よく測定できる汎用性の高いドップラ式超音波流量計を提供することを主な目的とする。

【0022】本発明の他の目的は、流体配管の種々の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる超音波の最適周波数あるいは超音波の最適入射角度を自動的に選定し、被測定流体の流量を超音波のドップラシフトを利用して正確に精度よく測定することができるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0023】さらに本発明の他の目的は、光学的流量測定方法が適用できない不透明あるいは半透明の液体であっても、流量を精度よく正確に測定できるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0024】本発明の別の目的は、流体配管内で旋回流や配管と平行でない流れが生じて、流体配管内を流れる被測定流体を正確に精度よく測定できるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0025】

【課題を解決するための手段】本発明に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、請求項 1 に記載したように、超音波トランスジューサから超音波パルスを流体配管内を流れる被測定流体に入射させる超音波送信手段と、被測定流体に入射された超音波パ

ルスのうち、流体配管内の測定領域から反射された超音波エコーを受信し、上記測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流速分布測定手段と、上記被測定流体の流速分布に基づいて被測定流体の流量を算出する流体流量演算手段と、前記流体配管の管壁に対し超音波トランスジューサから共鳴的透過現象を生じさせる超音波の基本周波数を自動的に選択する周波数選択設定手段とを有し、この周波数選択設定手段は、選択された最適周波数の超音波を超音波トランスジューサから発振させるように前記超音波送信手段を作動制御するものである。

【0026】また、上述した課題を解決するために、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、請求項 2 に記載したように、前記発振周波数選択設定手段は、超音波トランスジューサから発振される超音波パルスの発振周波数を自動的に調節設定しており、超音波半波長の整数倍が流体配管の壁厚となるように超音波パルスの発振周波数が選択されたものであり、さらに、請求項 3 に記載したように、前記発振周波数選択設定手段は、超音波トランスジューサから所要の発振周波数の超音波を発振させる発振用アンプと、この発振用アンプの発振周波数を可変可能に調節設定する発振周波数可変装置と、予め指定された周波数領域内で発振周波数可変装置を動作させる周波数領域設定手段と、前記超音波トランスジューサから発振された超音波パルスのうち、流体配管内の測定領域から反射される超音波エコーを受信する超音波受信手段と、受信された超音波エコーの強度を抽出し、記憶させる反射波強度抽出手段とを備え、前記発振周波数選択設定手段は発振周波数の抽出選定操作が繰り返行なわれて超音波の最適周波数が自動的に選択するものである。

【0027】さらに、上述した課題を解決するために、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、請求項 4 に記載したように、前記ドップラ式超音波流量計は、前記超音波トランスジューサから被測定流体内に入射される超音波パルスの入射角度を調節設定する入射角調節設定手段をさらに備え、この入射角調節設定手段は、流体配管の管壁に対し超音波パルスが共鳴的透過現象を生じさせる入射角度となるように、超音波トランスジューサを流体配管に調節設定可能に設け、前記周波数選択設定手段と入射角調節設定手段とを組み合わせたものである。

【0028】一方、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、請求項 5 に記載したように、超音波トランスジューサから超音波パルスを流体配管内を流れる被測定流体に入射させる超音波送信手段と、被測定流体に入射された超音波パルスのうち、流体配管内の測定領域から反射された超音波エコーを受信し、上記測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流体速度分布測定手段と、上記被測定流体の流速分布に基づいて、被測定流体の流量を算出する流体流量演算手段と、前記超音波トランスジューサから被測

定流体内に入射される超音波パルスの入射角度を調節設定する入射角調節設定手段とを備え、この入射角調節設定手段は、流体配管の管壁に対し超音波パルスが共鳴的透過現象を生じさせる入射角度となるように、超音波トランスジューサを流体配管に調節設定可能に設けたものである。

【0029】さらに、上述した課題を解決するために、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、請求項6に記載したように、前記入射角調節手段は、流体配管に外側から設けられた超音波トランスジューサと、この超音波トランスジューサから発振される超音波パルスの入射角度を調節設定可能な入射角変換機構と、予め指定された入射角領域の範囲内で上記入射角変換機構を動作させる入射角領域設定手段と、前記超音波トランスジューサから発振される超音波パルスのうち、流体配管内の測定領域から反射される超音波エコーを受信して超音波エコーの強度を抽出し、記憶する反射波強度抽出手段とを備え、前記入射角調節設定手段は、超音波パルス入射角度の抽出選定操作が繰返し行なわれて最適な超音波パルス入射角度を自動的に選択するものであり、さらに、請求項7に記載したように、前記超音波トランスジューサは流体配管の外側に取付角度が調節自在に設けられ、上記超音波トランスジューサの取付角度を入射角変換機構により選択することにより、超音波トランスジューサから発振される超音波パルスの入射角度を調節設定したものである。

【0030】他方、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、請求項8に記載したように、流体配管に設けられた第1の超音波トランスジューサと、この超音波トランスジューサから流体配管の軸方向に離間して設けられた第2の超音波トランスジューサと、第1の超音波トランスジューサを第2の超音波トランスジューサに相対的に進退させる超音波トランスジューサ移動機構とを備え、前記両超音波トランスジューサは発振される超音波パルスが流体配管内の測定領域で直交するように配設されたものである。

【0031】さらに、上述した課題を解決するために、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、請求項9に記載したように、前記ドップラ式超音波流量計は、前記第1および第2の超音波トランスジューサから発振された超音波パルスの流体配管内の測定領域から反射波である超音波エコーをそれぞれ受信する反射波レシーバと、各反射波レシーバで受信された超音波エコー強度から超音波測定線方向の速度ベクトルをそれぞれ算出する速度ベクトル算出手段と、各速度ベクトル算出手段で算出された速度ベクトルのベクトル和から被測定流体の流速ベクトルを算出する流速ベクトル算出手段とをさらに備え、流速ベクトル算出手段で算出される流体配管内の測定線方向の流速分布から被測定流体の流量を算出するものである。

【0032】

【発明の実施の形態】本発明に係るドップラ式超音波流量計の実施の形態について添付図面を参照して説明する。

【0033】図1は本発明に係るドップラ式超音波流量計の第1実施形態を示す図である。ドップラ式超音波流量計10は流体配管11内を流れる液体や気体等の被測定流体12の流速分布を測定し、流量を時間依存で瞬時に測定するものである。

【0034】ドップラ式超音波流量計10は、流体配管11内を流れる被測定流体12の流速を非接触で測定する超音波速度分布計測ユニット（以下、UVPユニットという。）13を備える。UVPユニット13は被測定流体12に測定線MLに沿って所要周波数（基本周波数 $f_0$ ）の超音波パルスを送信させる超音波送信手段15と、被測定流体12に入射された超音波パルスの測定領域からの反射波である超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体12の流速分布を測定する流体速度分布測定手段16と、被測定流体12の流速分布に基づいて演算処理して半径方向の積分を行ない、被測定流体12の流量を時間依存で求める流体流量演算手段としてのマイコン、CPU、MPU等のコンピュータ17と、このコンピュータ17からの出力を時系列的に表示可能な表示装置18と、流体配管11を流れる被測定流体12の最適周波数の超音波を自動的に選定する周波数選択設定手段19とを有する。

【0035】超音波送信手段15は、所要周波数の超音波パルスを発振させる超音波トランスジューサ20と、この超音波トランスジューサ20を発振させる信号発生器としての発振用アンプ21とを有する。発振用アンプ21は所要の基本周波数 $f_0$ の電気信号を発生させる発振器（オシレータ）23と、この発振器23からの電気信号を所定の時間間隔（ $1/F_{r,f}$ ）毎にパルス状に出力するエミッタ24（周波数 $F_{r,f}$ ）とを備え、この信号発生器である発振用アンプ21から所要の基本周波数 $f_0$ のパルス電気信号が超音波トランスジューサ20に入力される。

【0036】超音波トランスジューサ20はパルス電気信号の印加により基本周波数 $f_0$ の超音波パルスが測定線MLに沿って発信せしめられる。超音波パルスは例えばパルス幅5mm程度で拡がりをはほとんど持たない直進性のビームである。

【0037】超音波トランスジューサ20は送受信器を兼ねており、超音波トランスジューサ20は発信された超音波パルスが流体中の反射体に当たって反射される超音波エコーを受信するようになっている。反射体は被測定流体12中に一様に含まれる気泡であったり、金属の微粉末等のパーティクルであったり、または被測定流体12とは音響インピーダンスが異なる異物である。

【0038】超音波トランスジューサ20に受信された

超音波エコーは、反射波レシーバ27で受信され、この反射波レシーバ27でエコー電気信号に変換される。このエコー電気信号は増幅器28で増幅された後、A/D変換器29を通してデジタル処理され、このデジタルエコー信号が流体速度分布測定手段を構成する流速分布計測回路30に入力される。流速分布計測回路30には、発振用アンプ21からの基本周波数 $f_0$ の電気信号がデジタル化されて入力され、両信号の周波数差からドップラシフトに基づく流速の変化を計測し、測定線MLに沿う測定領域の流速分布を算出している。測定領域の流速分布を傾斜角 $\alpha$ で較正することで流体配管11の横断面における流速分布を計測することができる。

【0039】一方、超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスの基本周波数 $f_0$ は、流体配管11の壁厚に対し、共鳴的透過現象を生じさせるように周波数選択設定手段19にて最適値が選択される。超音波の金属壁透過特性は、流体配管11の壁厚が超音波の基本周波数 $f_0$ の $1/2$ あるいはその整数倍のとき、非常に高いことを知見した。

【0040】この知見に基づき、このドップラ式超音波流量計10には、流体配管11の管壁の肉厚を変化させることなく、各種の流体配管11に対し、共鳴的透過現象を生じさせる所要の基本周波数 $f_0$ を自由にかつ自動的に選択できる周波数選択設定手段19が組み込まれている。

【0041】この周波数選択設定手段19は、超音波トランスジューサから所要の発振周波数（基本周波数 $f_0$ ）の超音波を発振させる発振用アンプ21と、この発振用アンプ21の発振周波数を可変可能に調節設定する発振周波数可変装置31と、この発振周波数可変装置31に予め指定された範囲内、例えば200kHz～4MHzの周波数領域内で発振周波数可変装置31を動作させる基本周波数領域設定手段32と、前記流体配管11内の測定領域から反射される超音波エコーを受信する超音波受信手段としての反射波レシーバ27と、受信された超音波エコー信号を増幅器28で増幅した後、超音波エコー信号の強度を抽出し、記憶させるメモリを備えた反射波強度抽出手段33と、この反射波強度抽出手段33で抽出され、記憶された反射強度（超音波エコー強度）が表示される反射波強度表示機能を備えた表示装置18とを有する。

【0042】しかして、周波数選択設定手段19は、発振用アンプ21により超音波トランスジューサ20を加振させ、超音波パルスを発振させるが、発振用アンプ21の発振周波数 $f_0$ は、発振周波数可変装置31の出力信号に基づき決定される。発振周波数可変装置31は基本周波数領域設定手段32で予め定められた周波数領域内で、発振用アンプ21の発振周波数を可変自在に設定している。

【0043】周波数選択設定手段19は、反射波強度抽

出手段33および発振周波数可変装置31等の協働作用により、超音波の発振周波数の抽出選択操作が繰り返し行なわれ、流体配管11の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる超音波の最適周波数が自動的に選択され、設定される。

【0044】超音波の最適周波数が選択され、設定されると、発振周波数可変装置31からの出力信号により、発振用アンプ21の発振周波数が決定され、この発振用アンプ21により超音波トランスジューサ20を加振させて、超音波トランスジューサ20から最適周波数である所要の基本周波数 $f_0$ の超音波パルスが流体配管11内に発信される。

【0045】超音波トランスジューサ20から最適周波数の超音波パルスが発信されるので、充分な反射波S/N比を確保することができ、反射波である超音波エコーの信号を大きくとることができる。超音波エコー信号を大きくとるためには、流体配管11の壁厚（測定線ML方向の壁厚）に対し共鳴的透過現象を生じさせる超音波の基本周波数 $f_0$ を選択することが重要である。

【0046】流体配管11の壁厚が超音波半波長の整数倍になると、共鳴効果により、流体配管11の界面における超音波透過率が著しく増加し、超音波透過率の増大の結果、被測定流体12の反射体からの反射波である超音波エコー信号が増大する。

【0047】したがって、周波数選択設定手段19により、超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスの発振周波数が、流体配管11の壁厚に対し最適な基本周波数 $f_0$ が選択されると、超音波経路（測定線ML方向の走行路）中での減衰が小さくなり、また、流体配管11の界面での超音波透過率が増加するので、充分な反射波強度を得ることができる。

【0048】なお、図1において、符号35は超音波トランスジューサ20から発振される超音波を流体配管11内にスムーズに発振させ得るようにした接触媒体である。接触媒体35は超音波トランスジューサ20から発振されて流体配管11内に入射される音響インピーダンスを小さくして音響スイッチングを良好にするために設けられる。

【0049】また、第1実施形態では、超音波パルスの反射波である超音波エコーを反射波レシーバ27で受けるようにしたが、必ずしも反射波レシーバ27を単独で設ける必要がなく、反射波レシーバは超音波トランスジューサ20の受信機能に内蔵させてもよい。

【0050】次に、図2を参照してドップラ式超音波流量計10の作動原理を説明する。

【0051】図2（A）に示すように、超音波トランスジューサ20を流体配管11の放射方向に対し角度 $\alpha$ だけ被測定流体の流れ方向に傾けて設置した状態で、超音波トランスジューサ20から所要の基本周波数 $f_0$ の超音波パルスを入射させると、この超音波パルスは測定線



ML上の被測定流体12に様に分布する気泡や異物等の反射体に当たって反射し、図2(B)に示すように、反射波である超音波エコーaとなって超音波トランスジューサ20に戻される。なお、図2(B)において符号bは超音波パルス入射側の管壁で反射する多重反射エコーであり、符号cは、反対側管壁で反射する多重反射エコーである。超音波トランスジューサ20から発信される超音波パルスの発信間隔は $1/F_r$ である。

【0052】そして、超音波トランスジューサ20で発信したエコー信号をフィルタリング処理し、ドップラシフト法を利用して測定線MLに沿って流速分布を計測すると、図2(C)のように表示される。この流速分布はUVPユニット13の流体速度分布測定手段16で測定することができる。

【0053】ドップラシフト法は、流体配管11内を流れる被測定流体12中に超音波パルスを放射すると、被測定流体12中に混在するいは一様分布の反射体によって反射され、超音波エコーとなり、この超音波エコーの周波数が流速に比例した大きさだけ周波数シフトする原\*

$$m(t) = \rho \iint v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad \cdots(2)$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$ ：時間tにおける配管横断面上の中心から距離r、  
角度θの管軸方向の速度成分

【0058】(2)式より、ドップラ式超音波流量計10は、被測定流体12の流れの空間分布を瞬時、例えば50msec～100msec程度の応答速度で得ることができる。被測定流体12は流体配管(円管)11内の流れであっても、充分な助走区間をとれない場合や、弁の開閉やポンプの起動・停止などで時間的な揺らぎが存在する場合には、流体の流れは非定常状態で三次元分布をもっているが、このドップラ式超音波流量計10は、測定領域の流速分布を時間依存で瞬時に求めることができるので、被測定流体12の流量を定常状態、非定常状態如何を問わず、正確に精度よく求めることができる。

【0059】また、本発明に係るドップラ式超音波流量計10を用いて超音波トランスジューサ20から発振される超音波の透過特性の確認試験を行なった。

【0060】図3は超音波の壁面透過特性を示す試験結果である。

【0061】この試験に用いたドップラ式超音波流量計10は周波数選択設定手段19により超音波トランスジューサ20から発振される超音波の基本周波数を200kHzから数MHz、例えば2MHzまで5kHz刻みで自動的に調節設定できるようにしたものを用いた。

【0062】超音波の壁面透過試験は、250mmφの亚克力配管の一部にステンレス鋼を埋め込み、このステンレス鋼壁の外部に超音波トランスジューサ20を設置して超音波を入射し、亚克力配管対向側壁面からの

\*理を応用したものである。

【0054】また、超音波流体速度分布測定手段16で測定された被測定流体12の流速分布信号は流体流量演算手段としてのコンピュータ17に送られ、ここで流速分布信号を流体配管11の半径方向に積分し、被測定流体12の流量を時間依存で求めることができる。この被測定流体12の時間tにおける流量をm(t)とすると、次式で表わすことができる。

【0055】

【数1】

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA \quad \cdots(1)$$

但し、ρ：被測定流量の密度

$v(x \cdot t)$ ：時間tにおける速度成分(x方向)

【0056】(1)式から流体配管11を流れる時間tの流量m(t)は、次式に書き換えることができる。

【0057】

【数2】

超音波の反射強度を基本周波数を変化させて調べたものである。基本周波数を5kHz刻みで変化させたときの反射波の透過強度曲線h、i、jを示す。

【0063】超音波の壁面透過試験では、ステンレス鋼の壁厚が9.5mm、11.5mm、13mmの3種類を用意した。図3は、壁厚9.5mmのステンレス鋼による超音波の壁面透過試験例を示す。横軸が超音波の基本周波数fであり、縦軸は対向壁からの超音波の反射強度である。使用した3種類の超音波トランスジューサの特性周波数は、0.25MHz、0.5MHzおよび1MHzであり、その透過強度曲線は、符号h、i、jでそれぞれ表わされる。

【0064】一方、図3において、矢印l、m、nは、超音波の発振周波数波長とステンレス鋼の壁厚の関係を示すもので、超音波波長の低い方からステンレス鋼の壁厚の1/2倍、1倍および3/2倍の周波数位置を示す。

【0065】図3から、例えば1MHzの超音波トランスジューサを使用する場合、ステンレス鋼配管の壁厚に合わせ、約910kHzに基本周波数を設定して流量計測を行なうと、超音波の透過特性が良好であることがわかる。周波数の透過強度曲線jは、矢印nの位置で反射波の透過強度が高いことがわかる。

【0066】次に、図3に示された超音波の透過特性に基づき、壁厚9.5mmの炭素鋼(内径150mm)の流体配管を用意し、超音波トランスジューサ20の特性

周波数1MHzのものを使用し、超音波トランスジューサ20から発振される基本周波数 $f$ を910kHzに周波数選択設定手段19により選択設定し、被測定流体の流速分布を測定した。

【0067】この測定試験で得られた被測定流体の時間平均流速分布結果を図4に示す。被測定流体の流速分布の計測点は、60mm～150mmにおいて行なった。炭素鋼の流体配管の管中心部より手前側(0mm～60mmの範囲)では、壁内部における超音波の反射のために、十分な流速分布を得るのが困難であったが、管中心部より先方側の測定領域では、被測定流体12の流速分布に壁面の影響が表われず、比較的スムーズな平均流速分布曲線Oが得られた。

【0068】この平均流速分布曲線Oから、平均流速分布を流体配管11内で積分することにより、流体配管11内を流れる被測定流体12の流量を精度よく、被接触状態で測定することができる。

【0069】図5は本発明に係るドップラ式超音波流量計の第2実施形態を示す図である。

【0070】この実施形態に示されたドップラ式超音波流量計10Aは流体配管11内に入射される超音波パルスの最適周波数を選定する代りに、反射波のS/N比を向上させる方法として、流体配管11の壁厚を変化させて共鳴的透過現象を生じさせるようにしてもよい。

【0071】しかし、流体配管11の肉厚を変化させることは実際的には不可能であり、流体配管11の肉厚を変化させるのと等価な手段を、超音波トランスジューサ20の取付角度を変化させることにより、持たせたものである。

【0072】第2実施形態は、超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスの入射角度 $\alpha$ を入射角調節設定手段40で調節設定し、流体配管11の壁厚に適合する超音波の入射角度を自動的に選定したものである。第1実施形態に示されたドップラ式超音波流量計10と同じ部材には同一符号を付して説明を省略する。

【0073】図5に示されたドップラ式超音波流量計10Aは、周波数選定設定手段19に代えて入射角調節設定手段40を設けたものである。

【0074】入射角調節設定手段40は、流体配管11に外側から取付角度を調節自在に設けられた超音波トランスジューサ20と、この超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスの入射角度 $\alpha$ を調節設定可能な入射角変換機構41と、予め指定された入射角領域の範囲内に、例えば入射角度 $\alpha$ が5度～45度の角度領域幅の範囲内で変化可能に入射角変換機構41を動作させる入射角領域設定手段43と、前記流体配管11内の測定領域から反射される超音波エコーを受信して超音波エコーの強度を抽出し、記憶する反射波強度抽出手段44とを備え、反射波強度抽出手段44で抽出され、記憶された超音波エコー強度は、反射波強度表示機能を備え

た表示装置18で表示されるようになっている。

【0075】前記入射角調節設定手段40は、入射角変換機構41が超音波の入射角度 $\alpha$ を約5度～45度の範囲で変化させるようにした機構であり、この入射角変換機構41から出力される出力信号により、超音波トランスジューサ20の取付角度が最適値となるように自動的に調節設定される。超音波トランスジューサ20の取付角度は、入射角変換機構41から出力される出力信号により例えばステッピングモータ46等の取付角変更調整機構を駆動させて、超音波トランスジューサ20の取付角度を変更自在に調節設定している。

【0076】超音波トランスジューサ20から発振される超音波の入射角度 $\alpha$ は、流体配管11の管表面の垂直線あるいは垂直面との間に形成される角度である。超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスの入射角度は、流体配管11の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせるように、最適な角度が入射角調節設定手段40で設定される。

【0077】入射角調節設定手段40は、超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスの入射角度を入射角変換機構41からの出力信号により約5度～45度程の入射角の角度範囲内で変化させて反射波強度抽出手段44により反射波強度を抽出し、記憶させる。反射波強度抽出手段44で記憶された反射波強度は、表示装置18により表示される一方、超音波パルスの入射角度の抽出選択操作が入射角調節設定手段40で繰り返行なわれて超音波パルスの最適な入射角度が自動的に選択され、選定される。

【0078】入射角調節設定手段40により超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスの入射角度を最適角度に調節設定することにより、流体配管11の壁厚を物理的に変化させたものと等価となり、超音波トランスジューサ20から発振される超音波パルスにより、流体配管11内を流れる被測定流体12の流速分布および流量を正確に精度よく測定できる。

【0079】超音波トランスジューサ20から発振される超音波の入射角度(進入角度)を変化させると、物質内の伝搬距離、すなわち、流体配管11内の超音波伝搬距離が変化する。超音波伝搬距離を超音波半波長の整数倍に合わせることにより、流体配管11の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせ、十分な反射波S/N比を確保することができ、反射波である超音波エコーの強度を確保することができる。したがって、流体配管11内を流れる被測定流体の流速分布や流量を非接触で精度よく測定できる。

【0080】なお、ドップラ式超音波流量計の各実施形態では、周波数選択設定手段19と入射角調節設定手段40とをそれぞれ備えた例を示したが、1台のドップラ式超音波流量計に周波数選択設定手段19と入射角調節設定手段40を組み合わせるようにしてもよい。両



設定手段19と40を組み合わせて備えると、ドップラ式超音波流量計で最適周波数および最適入射角度を自動的に選択し、設定することが容易となる。

【0081】図1ないし図4に示されたドップラ式超音波流量計10、10Aは、超音波パルスと超音波エコーのドップラシフトを利用した流速分布の線測定法で被測定流体の流量を測定するものであるから、測定精度を向上させるためには、測定線MLの数、ひいては超音波トランスジューサ23の設置台数を増やす必要がある。実際にはN個の超音波トランスジューサ20を配管11の周方向に所要の間隔をおいて設置し、測定線MLは管壁への垂線に対し角度 $\alpha$ 傾斜させ、全ての測定線MLが配管11の軸線を通るようにセットしてもよい。

【0082】そこで、配管11内を流れる被測定流体12の流れが、管軸方向の流れで半径方向や角度 $\theta$ の流れ $v_r$ 、 $v_\theta$ を無視できるとすると、 $v_x \gg v_r$ 、 $v_x \gg v_\theta$ となり、流量計測は簡素化され、次式で表わされる。

【0083】

【数3】

$$m(t) = \sum_{i=1}^N \cdot \frac{2\pi}{N} \int_{-r}^r \{v_x(r \cdot \theta \cdot t) / \sin \alpha\} \cdot r \cdot dr \quad \dots\dots(3)$$

【0084】このように、求められた被測定流体12の流量は、表示装置18により時間依存で瞬時に表示することができる。この表示装置18には、被測定流体12の流体配管11内の測定線MLに沿う流速分布あるいは配管横断面における流速分布を表示することもできる。

【0085】図6から図8は本発明に係るドップラ式超音波流量計の第3実施形態を示すものである。

【0086】この実施形態に示されたドップラ式超音波流量計10Bは、図6に示すように、流体配管11内を流れる被測定流体12の超音波入射角度（進入角度）方向の速度成分 $V_z$ をドップラ周波数により算出し、この算出されたドップラ周波数から測定線MLに沿う流速分布を線測定法で求め、被測定流体12の流量を算出している。

【0087】このドップラ式超音波流量計10Bでは、超音波経路方向（測定線ML）に沿う速度ベクトル $V_z$ を、ドップラ周波数から算出し、速度ベクトル $V_z$ を $\sin \alpha$ で割り算することにより、流体配管11の軸方向に沿う速度ベクトル $V_1$ を算出している。

【0088】このドップラ式超音波流量計10Bでは、被測定流体12の流れが流体配管11に平行でない場合、流体配管11内に旋回流や流れが流体配管11内で平行でない流れが生じていると、正しい流速を算出することができない。例えば、図7に示すように、速度ベクトル $V_3$ を有する気泡が存在する場合、この速度ベクトル $V_3$ は被測定流体12の速度ベクトル $V_1$ と同じ方向の速度ベクトル $V_2$ を共有するため、見掛け上、被測定流体12の気泡の速度は大きな流体配管11の軸方向速

度と誤って算出してしまう。

【0089】この見掛け上の速度算出流量を解消するために、ドップラ式超音波流量計10Bは、2つの超音波トランスジューサ20、20aを備え、流体配管11に取り付ける。一方の超音波トランスジューサ20は他方の超音波トランスジューサ20aを直交するように設置し、両超音波トランスジューサ20と20aで双方の速度ベクトル $V_z$ 、 $V_4$ をそれぞれ求め、この速度ベクトル $V_z$ 、 $V_4$ のベクトル和を算出することにより被測定流体12の流速や気泡の流速を正しく求め得るようにしたものである。

【0090】このドップラ式超音波流量計10Bは、被測定流体12の流速を正しく測定するために、一方の超音波トランスジューサ20に対し他方の超音波トランスジューサ20aを流体配管11上で可動できる構造とする。

【0091】このため、ドップラ式超音波流量計10Bは、他方のトランスジューサ20aを一方の超音波トランスジューサ20に対し相対的に進退させる超音波トランスジューサ移動機構46を備え、図8に示す信号処理ブロック図のように構成される。

【0092】図8に示されたドップラ式超音波流量計10Bでは、両超音波トランスジューサ20、20aから発振される超音波パルスの入射方向が流体配管11内で互いに直交するように配置される。すなわち、ドップラ式超音波流量計10Bは、両超音波トランスジューサ20、20aから発振される超音波パルスが流体配管11内の測定領域で直交するように配設される。

【0093】前記ドップラ式超音波流量計10Bは、両超音波トランスジューサ20、20aから発振された超音波パルスの流体配管11内の測定領域から反射波である超音波エコーをそれぞれ受信する反射波レシーバ27、27aと、各反射波レシーバ27、27aで受信された超音波エコー強度から超音波測定線方向の速度ベクトルをそれぞれ算出する速度ベクトル算出手段47、47aと、各速度ベクトル算出手段47、47aで算出された速度ベクトルのベクトル和から被測定流体の流速ベクトルを算出する流速ベクトル算出手段48とを備え、流速ベクトル算出手段48で算出される流体配管11内の測定線方向MLの流速分布から被測定流体12の流量を算出するようにしたものである。

【0094】そして、両超音波トランスジューサ20、20aから発振された超音波パルスの流体配管11内の測定領域から反射される反射波の超音波エコーは各反射波レシーバ27、27aでそれぞれ受信される。各反射波レシーバ27、27aで受信された超音波エコーの強度信号は、速度ベクトル算出手段47、47aにより測定線ML方向（経路方向）の速度ベクトルに変換される。得られた経路方向の速度ベクトルのベクトル和を流速ベクトル算出手段48により算出し、被測定流体12

流速の正しい速度ベクトルを算出する。

【0095】上記速度ベクトル算出手段47、47aおよび流速ベクトル算出手段48により流速分布計測回路30を構成したり、流体配管11内を流れる被測定流体12の被測定流体12の流速分布が経路方向（測定線）MLに沿って測定され、この流速分布を超音波の経路方向に積分する演算をすることにより被測定流体12の流量を求めることができる。

【0096】流速分布計測回路30の流速ベクトル算出手段48である位置の流速を算出後、超音波トランスジューサ20または20aを超音波トランスジューサ移動機構46で流体配管11上を移動させることにより、次の位置におけるデータを採取する。超音波トランスジューサ移動機構46で超音波トランスジューサ20、20aを次々に移動操作させることにより、超音波パルスの経路方向に全体に亘って被測定流体12の流速分布を求め、その流量を演算により正確に求めることができる。

【0097】

【発明の効果】本発明に係るドップラ式超音波流量計においては、超音波のトランスジューサから発振される超音波パルスの発振周波数を自動的に選択設定する周波数選択設定手段を設けたり、また、超音波トランスジューサから発振される超音波パルスの入射角度を最適角度に選択設定する入射角調節設定手段を設けたので、流体配管の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる超音波の最適周波数や最適入射角度に自動的に設定でき、各種流体配管毎に最適な超音波トランスジューサを設ける必要がなく、高い汎用性を有し、流体配管内を流れる被測定流体の流量を簡単かつ容易に、しかも正確に精度よく非接触状態で計測することができる。

【0098】また、本発明に係るドップラ式超音波流量計では、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流量を正確に精度よく測定することができ、光学的流量測定手段では測定できない不透明あるいは半透明の流体であっても、また、流体配管内で旋回流や渦流、平行でない流れが生じている流体でも正確に精度よく測定できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第1実施形態を示す図。

【図2】本発明に係るドップラ式超音波流量計による流

量測定における動作原理を説明する図。

【図3】超音波の金属壁面透過特性を示す図。

【図4】流体配管内を流れる被測定流体の平均流速分布を示す図。

【図5】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第2実施形態を示す図。

【図6】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第3実施形態を説明するために用いた、超音波入射角度方向の速度成分をドップラ周波数により算出したイメージ図。

10 【図7】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第3実施形態を示す原理図。

【図8】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第3実施形態を示す信号処理ブロック図。

【符号の説明】

10、10A、10B ドップラ式超音波流量計

11 流体配管

12 被測定流体

13 超音波速度分布計測ユニット（UVPユニット）

15 超音波送信手段

20 16 流体速度分布測定手段

17 コンピュータ（流体流量演算手段）

18 表示装置

19 周波数選択設定手段

20 超音波トランスジューサ

21 発振用アンプ（信号発生器）

23 発振器（オシレータ）

24 エミッタ

27 反射波レシーバ（超音波受信手段）

28 増幅器

30 29 A/D変換器

30 流速分布計測回路

31 発振周波数可変装置

32 基本周波数領域設定手段

33 反射波強度抽出手段

35 接触媒体

40 入射角調節設定手段

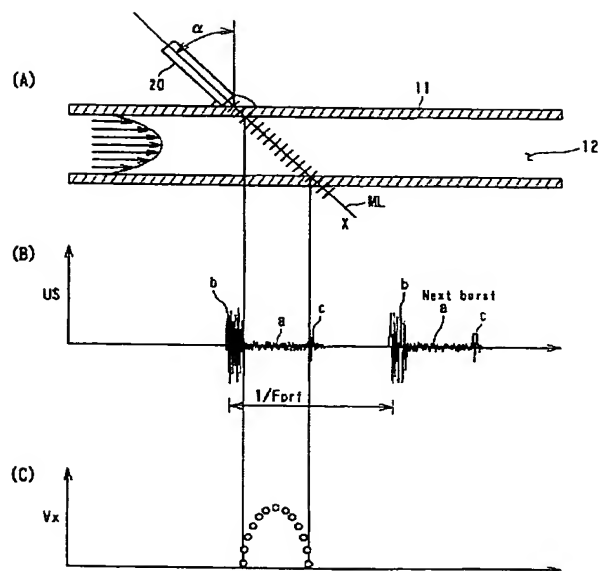
41 入射角度交換機構

43 入射角度領域設定手段

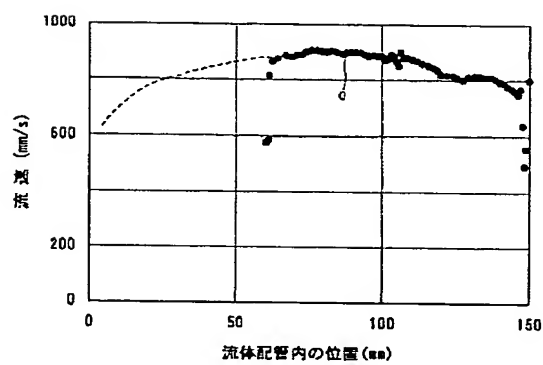
44 反射波強度抽出手段

40 46 超音波トランスジューサ移動機構

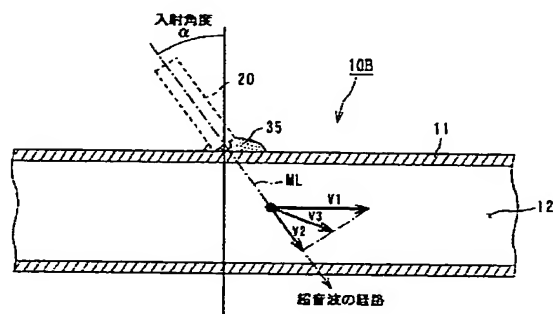
【圖2】



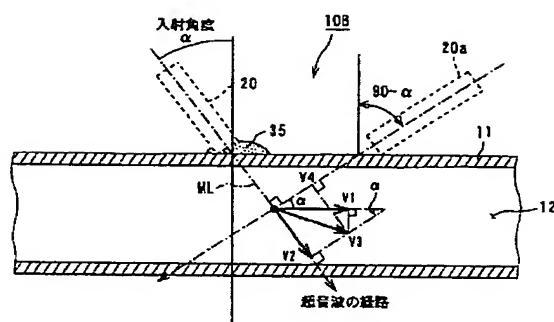
【図 4】



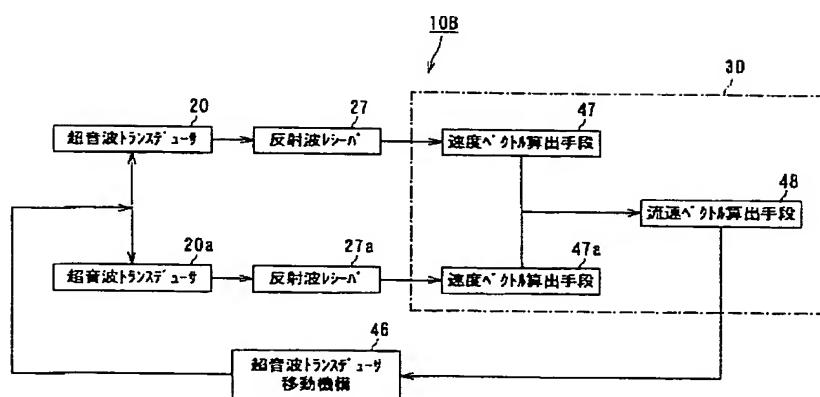
【図6】



【圖7】

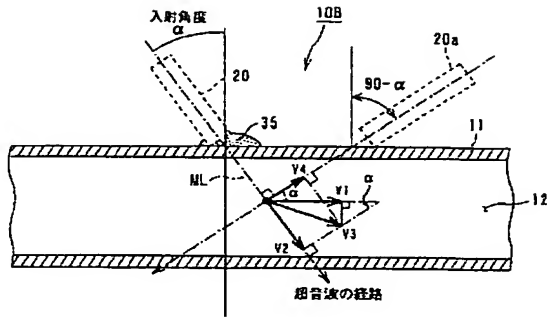


【图8】



【提出日】平成13年10月29日（2001. 10. 29）

【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 手塚 健一  
神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号  
東京電力株式会社原子力研究所内

(72)発明者 武田 靖  
スイス 5200 ブルッグ レーブモースヴ  
ェグ 75イー  
Fターム(参考) 2F035 DA05 DA13 DA23